

PEMAKAIAN DAN PERMODELAN DATA CERAPAN BUKAN
GEODETIK UNTUK KEGUNAAN ANALISA DEFORMASI

(THE ADOPTION AND MODELLING OF NON-GEODETIC OBSERVATION DATA FOR
THE PURPOSE OF DEFORMATION ANALYSIS)

ZAINAL ABIDIN BIN MD SOM

Laporan ini dikemukakan kepada
Research Management Centre
Universiti Teknologi Malaysia
Sebagai Laporan Akhir Projek Penyelidikan Vot 71813

Fakulti Kejuruteraan Dan Sains Geoinformasi
Universiti Teknologi Malaysia

NOVEMBER 2006

“Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya”.

Tandatangan :
Nama Penulis : ZAINAL ABIDIN BIN MD SOM
Tarikh : 30 November 2006

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Teknologi Malaysia (UTM Skudai) yang telah membiayai sepenuhnya projek penyelidikan jangka pendek ini. Penghargaan juga ditujukan kepada Research Management Centre (RMC), Universiti Teknologi Malaysia yang memberikan bantuan dan kerjasama dalam aspek pengurusan berkaitan penyelidikan ini.

Penulis juga mengambil kesempatan untuk menghargai sumbangan Pembantu Penyelidik, Mohd Azwan Abbas, yang telah banyak membantu dalam melaksanakan penyelidikan ini. Beliau telah membangunkan program komputer yang digunakan dalam membuat analisa deformasi yang dibincangkan dalam laporan ini.

ABSTRAK

Ukur deformasi dengan kaedah geodetik serta menggunakan peralatan geodetik semata-mata masih belum memenuhi keperluan untuk menghasilkan analisa deformasi yang sempurna. Kelemahan ini dapat diperbaiki dengan usaha menggabungkan pemakaian peralatan geodetik berserta peralatan peralatan bukan-geodetik (i.e., geoteknik dan struktur) dalam kerja pengukuran untuk analisa deformasi. Peralatan geoteknik seperti extensometer, inclinometer, pendulum dan sebagainya boleh memberi data cerapan yang boleh dimanfaatkan dalam menganalisa deformasi misalnya untuk aplikasi deformasi empangan dan jambatan.

Suatu perkara yang perlu diberi perhatian untuk membolehkan data cerapan bukan-geodetik diguna pakai dalam melakukan analisa deformasi adalah bersangkutan dengan model matematik yang perlu digunakan. Antara kandungan laporan ini adalah menyenaraikan beberapa rumusan dan juga model matematik yang boleh digunakan untuk permodelan deformasi khususnya bagi kes deformasi *single point displacement* dan *homogenous strain*.

ABSTRACT

Instruments and methods of geodetic survey alone cannot satisfy all requirements of deformation measurements. Geotechnical and other non-geodetic instrumentation is recommended to be used when gathering information for the purpose of analysing the deformation. The geotechnical instruments such as extensometer, inclinometers, pendulum and others can easily be adopted for data acquisition for deformation analysis purposes particularly for structures such as dams and bridges.

There is a special attention required with regard to the mathematical modelling in order for the non-geodetic observations data to be adopted and included in the analysis of deformation. This report highlights the relevant formulas and mathematical models to be used in modelling the deformation particularly for the case of single point displacement and homogenous strain.

KANDUNGAN

BAB	PERKARA	HALAMAN
	JUDUL	i
	PENGHARGAAN	iii
	ABSTRAK	iv
	ABSTRACT	v
	KANDUNGAN	vi
	SENARAI JADUAL	ix
	SENARAI RAJAH	x
1	Pengenalan	
	1.1 Pendahuluan	1
	1.2 Pernyataan Masalah	1
	1.3 Status Pemakaian Peralatan Geoteknik Dalam Ukur Deformasi	3
	1.4 Objek Kajian	5
	1.5 Organisasi Penulisan	5
2	Peralatan Bukan Geodetik Untuk Analisa Deformasi	
	2.1 Pendahuluan	7
	2.2 Pengenalan peralatan bukan geodetik	9
	2.3 Extensometer	10
	2.3.1 Fungsi Extensometer	10
	2.3.2 Pemakaian Extensometer	12

2.4	Kesengetan dan kecondongan	14
2.4.1	Tiltmeter	15
2.4.2	Fungsi Tiltmeter	16
2.5	Inclinometer	17
2.6	Pendulum	18
3	PARAMETER DEFORMASI DAN PERMODELAN DEFORMASI	
3.1	Pendahuluan	21
3.2	Analisa Deformasi Dalam Aspek Geometri	22
3.3	Parameter deformasi	23
3.4	Elemen-elemen Parameter Deformasi	23
3.5	Permodelan Deformasi	25
	Deformasi model <i>single point</i>	25
3.5.1	<i>movement</i> atau <i>rigid body displacement</i>	
3.5.2	Deformasi model <i>homogenous strain</i>	27
3.5.3	Gabungan <i>rigid body displacement+ different homogenous strain</i>	28
3.6	Rumusan	30
4	PERMODELAN DEFORMASI MENGGUNAKAN DATA GEOTEKNIK	
4.1	Pendahuluan	31
4.2	Model matematik asas permodelan deformasi	32
	Parameter deformasi dari data geodetik &	33
4.3	geoteknik	
4.3.1	Koordinat (geodetik)	34
	Perbezaan koordinat	35
4.3.2	(geodetik/geoteknik)	
4.3.3	Jarak (geoteknik)	36
4.3.4	Kecondongan (geoteknik)	37
4.3.5	Ketegangan (geoteknik)	38

4.4	Pengelasan Deformasi Tipikal	38
4.4.1	Deformasi Tipikal 1	39
4.4.2	Deformasi Tipikal 2	40
4.4.3	Deformasi Tipikal 3	41
5	REKA BENTUK & PEMBANGUNAN PERISIAN	
5.1	Pendahuluan	43
5.2	Fail Data Input	44
5.3	Reka bentuk program	44
5.4	Proses Peringkat Pertama	46
5.5	Proses Peringkat Kedua	47
5.6	Proses Peringkat Ketiga	48
5.7	Proses Peringkat Keempat	48
5.8	Contoh Pemakaian	48
6	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
6.1	Pengenalan	51
6.2	Kesimpulan	52
6.3	Cadangan	52
	SENARAI RUJUKAN	54 - 56

SENARAI JADUAL

NO. JADUAL	TAJUK	HALAMAN
5.1	Perbandingan keputusan pelarasan menggunakan program yang dibangunkan berbanding data sedia ada	50

SENARAI RAJAH

NO. RAJAH	TAJUK	HALAMAN
2.1	Pemakaian peralatan bukan geodetik pada empangan	7
2.2	Peralatan geoteknik dan struktur pada empangan	8
2.3	Contoh peralatan extensometer	10
2.4	Tape extensometer	11
2.5	Pemasangan extensometer pada titik rujukan	12
2.6	Elemen peralatan extensometer	12
2.7	Pemakaian extensometer pada dinding suatu struktur	13
2.8	Tolok bacaan extensometer dengan resolusi 0.05mm	13
2.9	Kesengetan atau kesendangan	14
2.10	Kecondongan	15
2.11	Tiltmeter	16
2.12	Alat inclinometer	17
2.13	Set-up pemasangan pendulum	18
2.14	Hanging pendulum	19
2.15	Inverted pendulum	19
2.16	Sistem bacaan pendulum	20
3.1	<i>Single point movement</i> atau <i>rigid body displacement</i>	26
3.2	<i>Homogenous strain</i>	27
3.3	Gabungan <i>rigid body displacement</i> dan <i>homogenous strain</i>	28
5.1	Carta alir program analisa deformasi yang dibangunkan	45

BAB 1

PENGENALAN

1.1 Pendahuluan

Analisa deformasi digunakan untuk berbagai pemakaian sama ada dalam bidang ukur mahu pun untuk kegunaan kejuruteraan. Kaedah geodetik telah banyak diaplikasi untuk kerja melibatkan kawasan yang luas seperti kes tanah mendap (land subsidence) dan dalam kerja berskala regional seperti penentuan pergerakan tektonik. Sungggoh pun kaedah geodetik ternyata mempunyai kelebihan untuk analisa deformasi bagi banyak kegunaan geodesi namun terdapat pula beberapa limitasi dalam pemakaiannya terutama untuk ukur deformasi yang melibatkan pengawasan struktur kejuruteraan seperti empangan, jambatan dan juga objek kejuruteraan bersaiz kecil.

Ukur deformasi diimplimen melalui penubuhan jaringan deformasi yang melibatkan pemilihan dan peletakan stesen ukur di lokasi yang

1.2 Pernyataan Masalah

Analisa deformasi yang dipelopori dan dikemukakan oleh para Juruukur adalah berasaskan serta diselesaikan menggunakan maklumat dari sumber geodetik. Data geodetik diperolehi dari kerja ukur menggunakan peralatan seperti teodolit, total station dan alat penerima GPS. Selanjutnya, cerapan geodetik tersebut digunakan sebagai data input untuk menghitung koordinat stesen kawalan dan

juga titik objek bagi jaringan yang ditubuhkan di kawasan yang dikaji. Analisa deformasi ditentukan berasaskan beza koordinat yang terhasil dari cerapan berulang yang dilakukan.

Sungguh pun kaedah geodetik ternyata mempunyai kelebihan untuk analisa deformasi bagi berbagai kegunaan geodesi namun terdapat beberapa limitasi dalam pemakaiannya terutama untuk ukur deformasi yang melibatkan pengawasan struktur kejuruteraan seperti empangan, jambatan dan juga objek kejuruteraan bersaiz kecil.

Antara kelemahan tersebut adalah ia tidak dapat memenuhi keperluan pengguna seperti para Jurutera yang mahukan gambaran deformasi bagi objek yang dikaji secara lebih menyeluruh. Data dan maklumat yang dibekalkan oleh perolehan data kaedah geodetik adalah bercorak diskret di mana stesen ukur hanya dapat ditempatkan di lokasi tertentu sahaja. Pengecaman deformasi menjadi pincang (biased) kerana wujudnya kelompangan informasi (information vacuum) akibat tidak kedapatan data dari tempat-tempat yang dirasakan deformasi sebenarnya mungkin berlaku. Sebagai contoh pada kes pengawasan struktur seperti empangan banyak maklumat yang kritikal yang perlu diperolehi dari bahagian dalaman struktur empangan yang tidak mungkin dapat diperolehi melalui kaedah geodetik.

Bagi para Jurutera, deformasi yang berlaku seharusnya dikaitkan pula dengan elemen yang lebih bermakna kepada bidang tugas mereka. Contohnya kepada Jurutera Struktur kecenderungan mereka adalah kepada penyelesaian mengaitkan deformasi yang berlaku dengan parameter yang bersangkutan seperti stress, strain dan sebagainya. Oleh itu analisa deformasi yang lengkap perlulah diikuti dengan prosidur permodelan deformasi untuk menghubungkan deformasi berkenaan dengan parameter deformasi yang berpadan.

Kelemahan perolehan data kaedah geodetik bukan sahaja mengakibatkan kekurangan maklumat untuk menyelesaikan analisa deformasi secara lebih bermakna malah ianya turut memberi impak dalam aspek permodelan deformasi memandangkan pengesanan deformasi serta permodelannya adalah saling berkait.

Satu alternatif bagi mengatasi kelemahan perolehan data kaedah geodetik adalah dengan mengeksploitasi pemakaian peralatan geoteknik. Peralatan geoteknik seperti tiltmeter, extensometer, strain gauge dan sebagainya merupakan peralatan yang banyak diguna pakai oleh para Jurutera Awam untuk membantu mereka dalam kerja pengawasan struktur seperti empangan. Sungguh pun peralatan geoteknik boleh membantu terutama dalam mendapatkan data untuk ukur deformasi di tempat seperti bahagian dalaman struktur namun ia belum memadai untuk digunakan secara bersendirian. Kaedah terbaik ialah menggabungkan cerapan yang diperolehi melalui kaedah geodetik dengan data yang disumbang oleh peralatan geoteknik.

1.3 Status Pemakaian Peralatan Geoteknik Dalam Ukur Deformasi

Pemakaian peralatan geoteknik dalam lingkungan ukur deformasi adalah suatu yang agak baru khususnya kepada para Juruukur. Ini tidak menghairankan sangat kerana ukur dan analisa deformasi itu sendiri diperkembang secara aktif agak lewat iaitu pada sekitar tahun 70-an. Publisiti mengenai pemakaian peralatan geoteknik dalam ukur deformasi mula mendapat liputan secara meluas menjelang pertengahan tahun 80-an. Berikut disenaraikan beberapa sumber rujukan yang boleh membantu bagi mendapatkan gambaran mengenai pemakaian peralatan geoteknik untuk ukur deformasi.

Pertubuhan Juruukur Antarabangsa (FIG) dalam satu persidangannya di Budapest (FIG, 1982) telah mengusulkan supaya pemakaian peralatan geoteknik

secara berintegrasi dengan kaedah geodetik dipergiatkan khususnya untuk tujuan analisa deformasi. Usul tersebut diketengahkan menyedari kekurangan dan kelemahan yang wujud dalam tugas menganalisa deformasi yang diselesaikan melalui kaedah geodetik semata.

Pengenalan dan latar belakang penggunaan peralatan bukan-geodetik amnya dan peralatan geoteknik khususnya telah dihuraikan dengan terperinci oleh Chrzanowski (1986). Teskey (1986) dan Rauhut (1987) pula menunjukkan bagaimana data geoteknik boleh diintegrasikan bersama dengan kaedah geodetik untuk analisa deformasi dengan menggunakan empangan dan struktur kejuruteraan (i.e., Stadium Olimpik) sebagai kajian kes.

Usaha mempromosi pemakaian peralatan geoteknik untuk digabung bersama penggunaan kaedah geodetik terus menerima sambutan yang baik. Ini dapat dilihat dari banyaknya laporan dan kertas kerja yang dibentangkan di pelbagai Seminar dan Simposium anjuran FIG. Di Canada umpamanya, Wroblewicz et. al (1988) telah menghuraikan pemakaian peralatan geoteknik yang agak intensif untuk ukur deformasi di sebuah stesen penjana elektrik (Mactaquac Generating Station). Chrzanowski et. al (1988) pula telah menunjukkan analisa deformasi bagi ukur deformasi di Mactaquac tersebut yang menggabungkan data geodetik dengan geoteknik.

Kaedah yang sama telah juga diimplemen di berbagai tempat yang lain. Sebagai contoh Pretorius et. al (2001) membincangkan satu contoh pemakaian di Katse Dam, Lesotho, Afrika. Selain dari pemakaian untuk ukur deformasi, penggunaan peralatan geoteknik dan geodetik turut juga diperkembangkan pemakaiannya untuk pemantauan tanah runtuh seperti mana di Hong Kong (Ding et. al., 2003).

1.4 Objektif Kajian

Kajian yang dibincangkan menggariskan objektif berikut;

- i. menghuraikan tentang pemakaian peralatan geoteknik untuk kegunaan ukur deformasi dengan fokus kepada peralatan utama seperti extensometer, inclinometer dan strainmeter
- ii. menunjukkan bagaimana model matematik melibatkan data geoteknik dapat diterbitkan
- iii. mengemukakan kaedah bagi mengimplementasi pemakaian data geoteknik untuk tujuan analisa deformasi

Melihat kepada objektif yang disenaraikan, ternyata tumpuan kajian adalah diberikan kepada membincangkan pengenalan dan juga perkara asas mengenai pemakaian peralatan geoteknik dalam kerja ukur deformasi. Perbincangan sedemikian adalah perlu memandangkan pemakaian data geoteknik dalam ukur deformasi adalah agak baru di Malaysia.

1.5 Organisasi Penulisan

Penulisan laporan ini adalah meliputi kandungan yang disusun dalam enam Bab. Penerangan mengenai pengenalan dan latar belakang kajian yang diusahakan diletakkan di Bab 1. Bab 2 pula menghuraikan tentang beberapa peralatan bukan geodetic yang kerap digunakan dalam ukur deformasi. Bab 3 pula memuatkan perbincangan mengenai parameter deformasi dan juga bentuk permodelan yang digunakan dalam menganalisa deformasi.

Selanjutnya, dalam Bab 4 dimuatkan segala rumusan dan model matematik yang terpakai dalam menganalisa deformasi menggunakan cerapan geodetik dan juga geoteknik. Bab 5 difokuskan kepada penjelasan mengenai reka bentuk dan juga

cara pemakaian program analisa deformasi yang dibangun. Laporan di akhiri dengan Bab 6 sebagai memuatkan kesimpulan dan mengusulkan cadangan yang dapat diusahakan sebagai kajian lanjutan di masa depan.

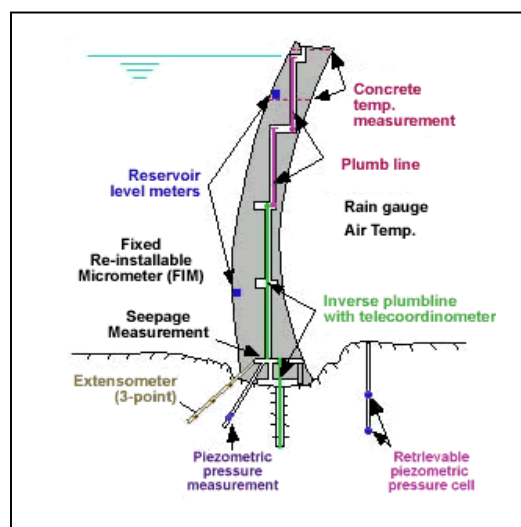
BAB 2

PERALATAN BUKAN GEODETIK UNTUK ANALISA DEFORMASI

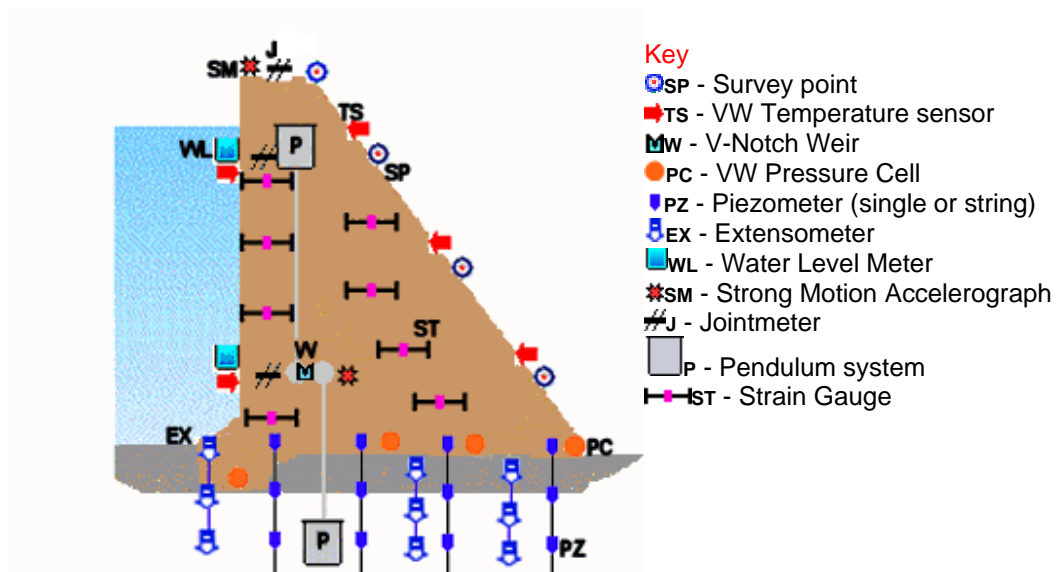
2.1 Pendahuluan

Terdapat berbagai jenis peralatan bukan geodetik yang digunakan untuk pelbagai tujuan berhubung dengan analisa deformasi. Kebanyakan peralatan tersebut merupakan instrumen yang digunakan dalam bidang kejuruteraan terutamanya berkait dengan dua disiplin kejuruteraan awam iaitu geoteknik dan struktur.

Pemakaian peralatan geoteknik dan struktur telah banyak diimplemen dalam ukur deformasi contohnya untuk pengawasan empangan (USACE, 1980), (Avella, 1993) dan (USACE, 2002). Sebagai contoh Rajah 2.1 dan Rajah 2.2 menunjukkan profil sebuah empangan dan lokasi menempatkan peralatan geoteknik dan struktur.



Rajah 2.1: Pemakaian peralatan bukan geodetik pada empangan



Rajah 2.2: Peralatan geoteknik dan struktur pada empangan

Berdasarkan Rajah 2.1 dan Rajah 2.2, antara peralatan utama yang ditunjukkan dapat disenaraikan seperti berikut;

- extensometer
- plumblines
- pendulum
- strain gauge
- piezometer
- jointmeter.

Secara umumnya adalah agak sukar untuk mengelaskan suatu peralatan tertentu sebagai peralatan geoteknik atau peralatan struktur. Hal ini kerana fungsi peralatan geoteknik dan struktur adalah saling bersamaan. Sebagai contoh extensometer adalah peralatan yang digunakan untuk mengukur perubahan jarak dan pemakaiannya boleh digunakan sama ada untuk kegunaan geoteknik mahu pun untuk kegunaan struktur.

2.2 Pengelasan peralatan bukan geodetik

Memandangkan terlalu banyak peralatan bukan geodetik yang ada maka bagi memudahkan pengelasannya untuk maksud analisa deformasi Chrzanowski (1986) telah mengkategorikan mereka kepada tiga kegunaan utama iaitu;

- i. peralatan untuk menentukan sifat fizikal bagi bahan boleh berubah bentuk (deformable materials).
- ii. peralatan untuk menentukan daya dan beban yang bertindak ke atas sesuatu bahan dan penentuan berkait tegangan dalaman (internal stresses)
- iii. peralatan untuk menentukan perubahan dimensi dan bentuk.

Bagi maksud analisa deformasi secara geometri peralatan dalam kategori (iii) adalah paling relevan. Perolehan data menggunakan peralatan yang dapat menentukan perubahan dimensi dan perubahan bentuk sangat bermakna untuk maksud analisa deformasi. Oleh itu kajian ini seterusnya akan melibatkan perbincangan mengenai peralatan sedemikian.

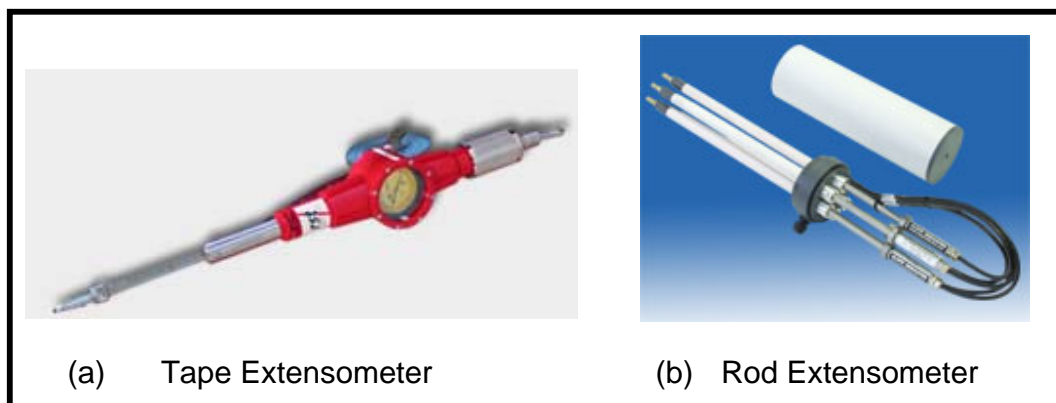
Selanjutnya, Chrzanowski (1986) mengelaskan pula peralatan dalam kategori (iii) berkenaan kepada tiga kategori iaitu;

- peralatan untuk mengukur pemanjangan (perubahan jarak) dan terikan (strain). Contoh peralatan – extensometer dan strainmeter.
- peralatan untuk mengukur kesengetan dan kecondongan dan perubahan mereka. Contoh peralatan – tiltmeter dan inclinometer.
- peralatan untuk mengukur penjajaran (alignment) dan perubahannya. Kebanyakan peralatan untuk penjajaran adalah menggunakan pengukuran berasaskan laser.

Perbincangan berikutnya akan hanya berfokus kepada peralatan untuk untuk menentukan perubahan dimensi dan bentuk yang melibatkan peralatan seperti extensometer, tiltmeter, inclinometer dan pendulum.

2.3 Extensometer

Terdapat berbagai jenis extensometer seperti tape extensometer, rod extensometer, borehole extensometer, wire extensometer dan sebagainya. Extensometer dikelaskan pula kepada dua kategori iaitu mekanikal dan elektro-mekanikal. Para Jurutera Awam menggunakan extensometer sebagai peralatan yang membantu mereka dalam kerja yang melibatkan penentuan dimensi dan pengukuran jarak pada struktur.



Rajah 2.3: Contoh peralatan extensometer

2.3.1 Fungsi Extensometer

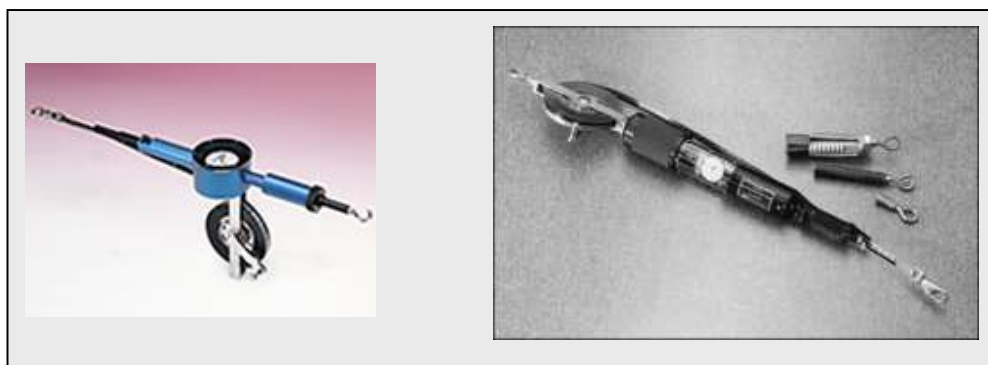
Extensometer digunakan untuk mengukur perubahan jarak di antara dua titik rujukan pada sesuatu struktur. Berikut adalah antara contoh pemakaian extensometer yang tipikal;

- pemantauan dan pengawasan *convergence* pada dinding terowong
- pemantauan deformasi ruang bawah tanah
- pengawasan deformasi pada pelbagai struktur seperti empangan, tembok penahan, jambatan dan sebagainya.

Perubahan jarak pada sesuatu struktur boleh berlaku disebabkan oleh berbagai faktor. Antaranya ialah akibat keadaan tanah yang mengalami mampatan atau telah berubah secara menaik. Berikut adalah punca-punca lain yang boleh mengakibatkan perubahan pada sesuatu struktur;

- wujudnya pergerakan pada dinding sesuatu struktur kerana faktor *convergence*,
- kesan kerja pengorekan di bawah tanah,
- kewujudan terikan pada batuan dan juga bahan binaan,
- berlakunya pemisahan di antara lapisan batuan disekitar kawasan pembinaan terowong
- kesan cerun yang tidak stabil.

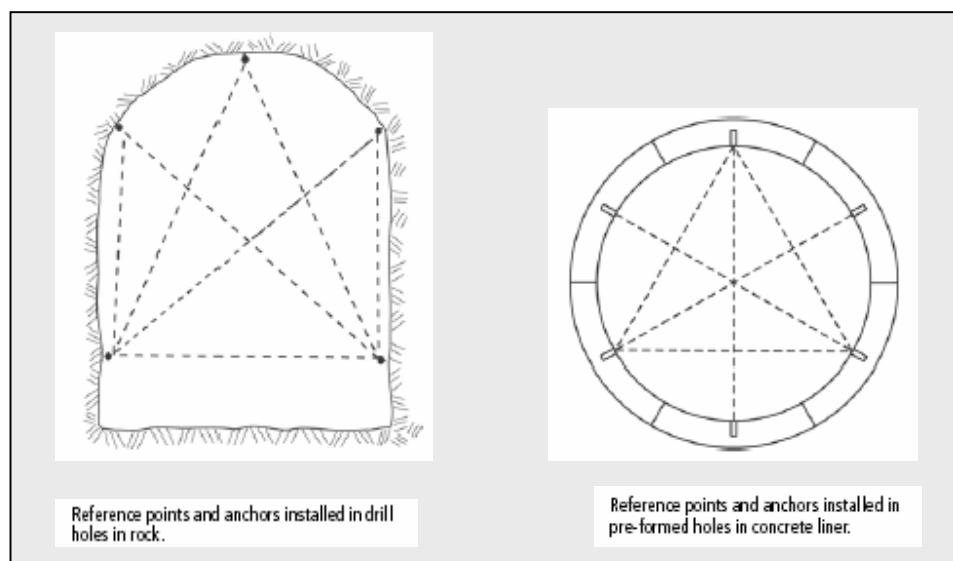
Memandangkan banyaknya fungsi dan kegunaan extensometer maka ia dikenali juga dengan berbagai nama lain bersesuaian dengan pemakaiannya seperti *strainmeter*, *convergencemeter* dan *fissuremeter*.



Rajah 2.4: Tape extensometer

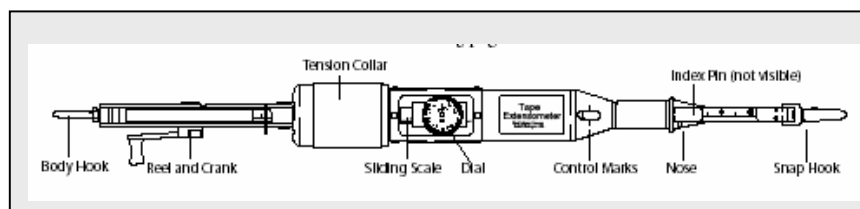
2.3.2 Pemakaian Extensometer

Penggunaan extensometer melibatkan pemasangan titik rujukan pada struktur yang hendak diukur. Pengukuran dilakukan dengan meregang extensometer dengan memasang kedua hujungnya pada titik rujukan tersebut. Rajah 2.5 menunjukkan gambaran pemakaian extensometer untuk pengukuran di ruang bawah tanah dan di dinding terowong.



Rajah 2.5: Pemasangan extensometer pada titik rujukan

Extensometer terdiri dari berbagai elemen yang membolehkan ia dipasang dengan tegang pada kedua titik rujukan yang telah disediakan di tempat pengukuran. Rajah 2.6 menunjukkan elemen bagi satu peralatan extensometer.

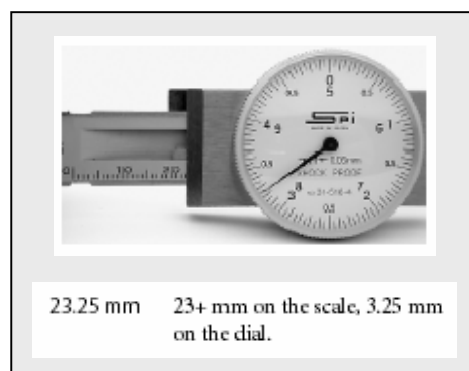


Rajah 2.6: Elemen peralatan extensometer

Rajah 2.7 pula menunjukkan satu gambaran pemakaian extensometer untuk pengukuran pada dinding suatu struktur.



Rajah 2.7: Pemakaian extensometer pada dinding suatu struktur
(Sumber - <http://www.leojovian.com/Monitoring/MonitoringService.htm>)



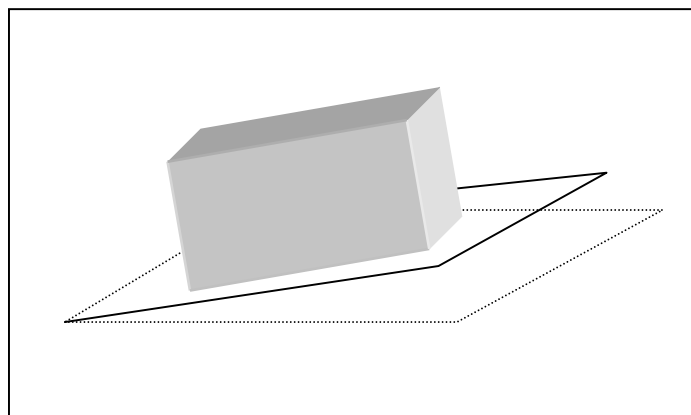
Rajah 2.8: Tolok bacaan extensometer dengan resolusi 0.05mm

Apabila telah dipasang tegang maka bacaan yang diperlukan boleh dibaca pada tolok bacaan extensometer berkenaan. Ketepatan bacaan adalah bergantung kepada model extensometer yang digunakan. Sebagai contoh Rajah 2.8 menunjukkan satu contoh bacaan yang diberikan oleh satu tolok extensometer dengan resolusi 0.05mm. Perubahan jarak dapat diketahui dengan membandingkan bacaan jarak terkini dengan pengukuran yang dibuat terdahulu.

2.4 Kesengetan dan kecondongan

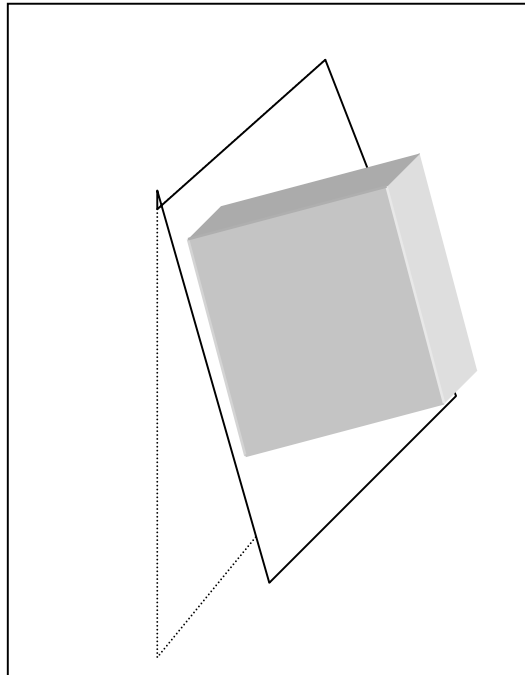
Deformasi sesuatu struktur ternyata dapat dikesan melalui perubahan jarak yang diukur menggunakan extensometer. Selain dari perubahan jarak terdapat satu lagi fenomena yang boleh digunakan untuk pengecaman deformasi sesuatu struktur iaitu kesengetan dan kecondongan. Komponen kesengetan dan kecondongan sesuatu struktur boleh diukur dan dipantau perubahannya menggunakan peralatan tertentu seperti tiltmeter, inclinometer, pendulum dan seumpamanya.

Kesengetan atau kesendengan (tilt) berlaku apabila permukaan mengufuk sesuatu struktur mengalami perubahan. Kesengetan boleh ditentukan dengan pengukuran menggunakan tiltmeter.



Rajah 2.9: Kesengetan atau kesendengan

Kecondongan (inclination) ditakrifkan terjadi apabila perubahan yang berlaku ialah pada permukaan menegak sesuatu struktur. Kecondongan boleh ditentukan dengan pengukuran menggunakan inclinometer. Selain inclinometer kecondongan boleh juga ditentukan dengan alat pendulum.



Rajah 2.10: Kecondongan

2.4.1 Tiltmeter

Tiltmeter merupakan peralatan yang digunakan untuk mengesan perubahan kesengetan sesuatu struktur. Kesengetan sesuatu struktur serta perubahannya boleh berlaku disebabkan oleh berbagai faktor. Antara faktor tersebut adalah kesan yang disebabkan oleh aktiviti pembinaan seperti kerja pengorekan, membina terowong, mengalirkan air dari kawasan pembinaan dan sebagainya. Aktiviti pembinaan sedemikian mengakibatkan berlaku perubahan pada tanah persekitaran dan juga pada struktur yang terbabit.



Rajah 2.11: Tiltmeter

Selain itu bagi sebuah empangan kesengetan boleh berlaku kerana impak menakung air terutama pada peringkat awal pemakaian sesuatu empangan. Pada sebuah jambatan pula kesengetan biasanya dikaitkan dengan pengaruh trafik dan juga angin.

2.4.2 Fungsi Tiltmeter

Berikut disenaraikan beberapa pemakaian tiltmeter yang tipikal untuk kegunaan berkait ukur deformasi;

- pengecaman berlakunya tanah mendap (ground subsidence) dengan meletak tiltmeter secara bersiri pada profil di tempat terlibat
- untuk mendapat gambaran profil sesuatu struktur tegak seperti menara tinggi dengan meletak tiltmeter di beberapa tempat pada tinggi yang berlainan
- untuk mengkaji kestabilan cerun dan pengawasan empangan bentuk tambakan (embankment).

2.5 Inclinator

Inclinometer adalah peralatan yang digunakan untuk pengukuran kecondongan serta perubahan kecondongan struktur.



Rajah 2.12: Alat Inclinator
(Inclinometer Probe - Geokon Model 6000)

Pemakaian inclinometer selalunya dikaitkan dengan penggunaan seperti berikut;

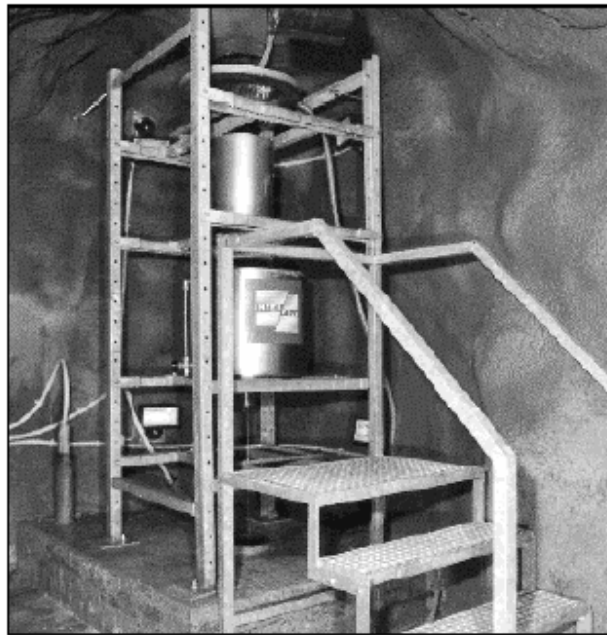
- mengesan sebarang pesongan yang berlaku pada dinding struktur akibat kerja pengorekan di sekitar tempat kerja
- menentukan tahap kecondongan yang berlaku pada syaf dan terowong
- memantau kecondongan pada cerun yang tidak stabil
- mengawasi kecondongan yang berlaku pada struktur seperti empangan, tembok penahan dan sebagainya.

Kecondongan yang diukur oleh alat inclinometer dinyatakan dalam bentuk arka sudut. Sebagai contoh resolusi pengukuran dengan inclinometer Model 6000 (Rajah 2.12) ialah ± 10 arka sudut (i.e., bersamaan $\pm 0.05\text{mm/m}$). Spesifikasi alat yang sama menyatakan kejituan yang mampu dicapai ialah pada tahap $\pm 6\text{mm}/30\text{m}$.

2.6 Pendulum

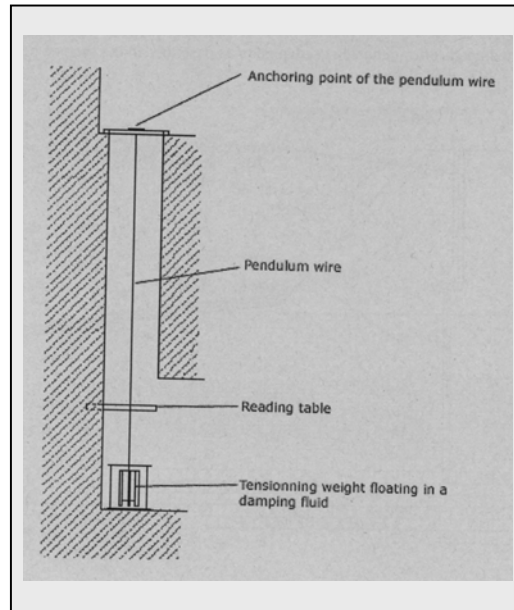
Pendulum adalah satu lagi peralatan yang boleh digunakan untuk mengukur kecondongan dan kesendengan. Rajah 2.13 menunjukkan gambaran set-up bagi pemasangan pendulum.

Pendulum System

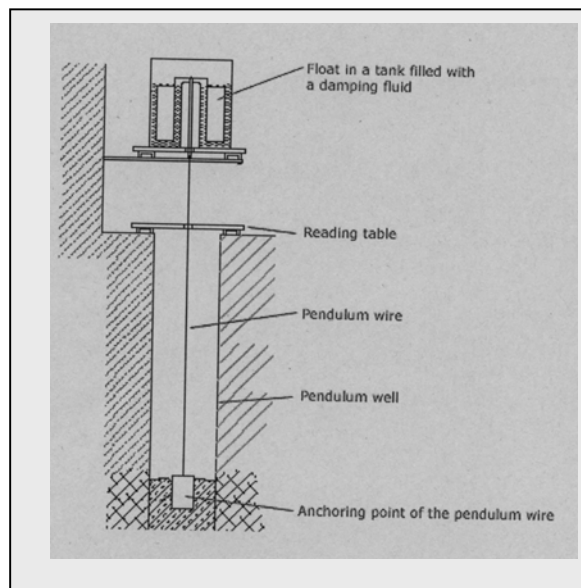


Rajah 2.13: Set-up pemasangan pendulum

Pendulum merupakan satu sistem pengukuran yang berasaskan wayar yang tergantung dan tertegak secara graviti. Oleh yang demikian ia dapat digunakan untuk menentukan dan menguji kecondongan objek yang diukur. Terdapat dua jenis pendulum yang boleh digunakan iaitu *hanging pendulum* (Rajah 2.14) dan *inverted pendulum* (Rajah 2.15).



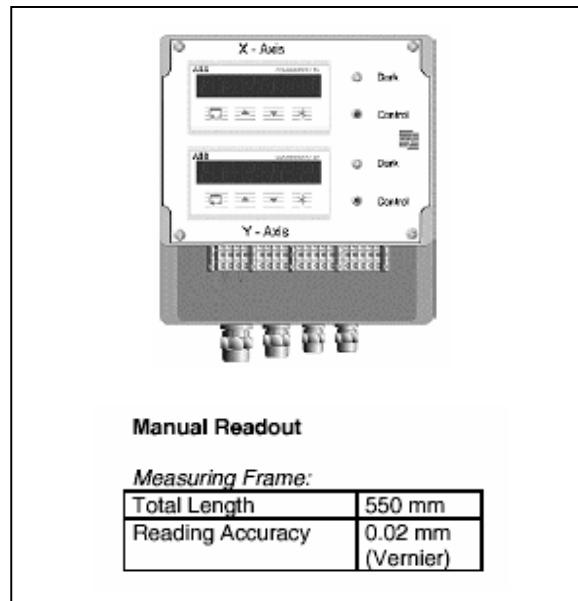
Rajah 2.14: Hanging pendulum



Rajah 2.15: Inverted pendulum

Kecondongan yang diukur oleh pengukuran dengan pendulum bukanlah dalam bentuk arka sudut sebagaimana diperolehi oleh inclinometer tetapi dinyatakan

dalam bentuk bezaan koordinat pada paksi X dan Y. Ketepatan pengukuran bergantung kepada model pendulum yang digunakan. Sebagai contoh resolusi pendulum yang ditunjukkan oleh Rajah 2.16 ialah 0.02mm.



Rajah 2.16: Sistem bacaan pendulum

BAB 3

PARAMETER DEFORMASI & PERMODELAN DEFORMASI

3.1 Pendahuluan

Analisa deformasi merupakan satu proses yang kompleks dan melibatkan beberapa prosedur penting seperti berikut;

- i. kerja ukur lapangan untuk pengumpulan data cerapan dalam beberapa epok
- ii. penilaian data cerapan meliputi proses pengesanan selisih kasar serta penganggaran komponen varians untuk memperolehi pemberat yang berpadanan
- iii. analisis geometri iaitu perbandingan beza koordinat antara dua epok bagi pengecaman sama ada berlakunya deformasi atau tidak pada jaringan ukur berkenaan
- iv. permodelan deformasi iaitu pemilihan model deformasi serta menganggarkan parameter deformasi yang bersesuaian.

Pemakaian peralatan bukan-geodetik (i.e., geoteknik dan struktur) diperingkat pengumpulan data telah dibincangkan dalam dua Bab sebelum ini. Proses penilaian data cerapan pula merupakan satu aspek yang agak penting dalam analisa deformasi dan ia diimplemen di peringkat hitungan pelarasan. Penilaian data cerapan boleh diselesaikan dengan menggunakan teknik statistik seperti Minimum Norm Quadratic Estimation (MINQE) dan Maximum Likelihood Estimates (MLE) seperti mana dilaporkan oleh Zainal Abidin Md. Som (1996 dan 2000). Perbincangan lanjut mengenai penilaian data cerapan adalah di luar skop kajian dan tidak akan disentuh dalam penulisan laporan ini. Sebaliknya, laporan

akan memfokus kepada dua aspek seterusnya iaitu berkaitan analisis geometri serta permodelan deformasi khususnya bagi kes yang melibatkan pemakaian peralatan geoteknik dan struktur.

3.2 Analisis Deformasi Dalam Aspek Geometri

Deformasi berlaku pada sesuatu jasad apabila ada daya luaran bertindak ke atas jasad tersebut. Tindak balas daya berkenaan mengakibatkan tegasan dalaman (*internal stresses*) terhasil. Sekiranya tegasan yang wujud melebihi amaunnya yang kritikal maka jasad berkenaan akan mengalami deformasi atau kecacatan iaitu berubah bentuk dan dimensinya. Perubahan bentuk dan dimensi adalah fenomena yang berciri geometri maka kewujudan deformasi dapat dikenal pasti melalui proses hitungan yang dipanggil sebagai analisis deformasi geometri (Chen, 1983, Chrzanowski et. al, 1986).

Hitungan pelarasan ganda dua terdikit (*least squares adjustment*) merupakan langkah penting dalam menyelesaikan analisis deformasi geometri. Pelarasan perlu dihitung secara berasingan bagi setiap epok menggunakan data cerapan yang telah diperolehi. Hasil hitungan pelarasan akan memberikan nilai-nilai koordinat terlaras bagi kesemua titik yang terdapat dalam satu jaringan ukur deformasi. Bagi jaringan yang telah dicerap berulang kali, hasil pelarasan yang diselesaikan akan membolehkan beza koordinat bagi setiap titik serta matriks kovarians mereka dihitung. Seterusnya, melalui perhitungan beza koordinat tersebut sebarang perubahan bentuk dan dimensi akan dapat dikesan.

Analisis geometri diikuti dengan objektif selanjutnya iaitu untuk memastikan sama ada beza koordinat yang terhasil boleh dikaitkan sebagai telah wujud deformasi atau perbezaan tersebut bukanlah deformasi sebaliknya berlaku akibat ralat atau selisih hitungan semata-mata. Di peringkat inilah pemakaian elemen matriks kovarian menjadi sangat penting.

3.3 Parameter deformasi

Deformasi yang berlaku pada sesuatu jasad dapat diperjelas dan diinterpretasi melalui elemen yang dipanggil parameter deformasi. Bagi kes spatial 3D, terdapat sejumlah 9 parameter deformasi yang perlu diketahui iaitu 6 komponen tegasan (*strain*) dan 3 komponen putaran (*differential rotation*). Parameter tersebut perlu diselesaikan untuk setiap titik deformasi pada jasad berkenaan yang mana mereka diwakili oleh titik pada jaringan ukur yang ditubuhkan. Oleh yang demikian, satu analisa deformasi yang lengkap tidak berakhir setakat analisis geometri sahaja. Sebaliknya, analisis deformasi perlu disertai dengan langkah hitungan untuk penyelesaian bagi mengenal pasti parameter deformasi yang berpadanan dengan deformasi berkenaan.

Satu dari manfaat penentuan dan penyelesaian parameter deformasi ialah dapat memberi maklumat mengenai respons sesuatu jasad terhadap daya terikan yang bertindak ke atasnya (*its response to loading stress*). Selain itu, penyelesaian parameter deformasi akan memberi pemahaman secara lebih jelas mengenai deformasi berkenaan dari segi mekanik. Pemakaian parameter deformasi selanjutnya ialah untuk melaksanakan pengujian terhadap berbagai hipotesis yang berkaitan tentang kelakunan jasad deformasi berkenaan.

3.4 Elemen-elemen Parameter Deformasi

Sebagaimana disebutkan dalam para 3.3, parameter deformasi adalah terdiri daripada sejumlah sembilan elemen iaitu 6 parameter tegasan dan 3 parameter putaran. Parameter deformasi berkenaan sebenarnya boleh diperolehi melalui proses hitungan menggunakan maklumat hasil analisis geometri. Secara matematikanya hasil analisis geometri dipanggil anjakan dan dinyatakan sebagai berikut;

$$d(x, y, z; t-t_0) = \begin{bmatrix} u(x, y, z; t-t_0) \\ v(x, y, z; t-t_0) \\ w(x, y, z; t-t_0) \end{bmatrix}$$

yang mana u, v, w adalah nilai-nilai anjakan yang dihitung pada paksi x, y dan z . Maklumat (u, v & w) merupakan dapatan yang diselesaikan di peringkat analisis geometri. Kesemua sembilan parameter deformasi (i.e., 6 komponen tegasan & 3 komponen putaran) diterbitkan berdasarkan persamaan 3.1. Enam komponen tegasan yang dimaksudkan terdiri dari 3 tegasan normal (*normal strains*) iaitu $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ dan tiga tegasan ricih (*shearing strains*) $\epsilon_{xy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}$.

Tegasan normal masing-masingnya merupakan pemanjangan atau pemendekan yang berlaku pada arah x, y dan z iaitu;

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \delta u / \delta x, \\ \epsilon_y &= \delta v / \delta y, \\ \epsilon_z &= \delta w / \delta z \end{aligned}$$

Komponen tegasan ricih pula diterbitkan sebagai;

$$\begin{aligned} \epsilon_{xy} &= (\delta u / \delta y + \delta v / \delta x) \div 2, \\ \epsilon_{xz} &= (\delta u / \delta z + \delta w / \delta x) \div 2, \\ \epsilon_{yz} &= (\delta v / \delta z + \delta w / \delta y) \div 2. \end{aligned}$$

Selain parameter deformasi komponen tegasan, terdapat pula 3 parameter deformasi yang tergolong dalam kelompok putaran iaitu;

$$\begin{aligned} \omega_x &= (\delta v / \delta z - \delta w / \delta y) \div 2 \\ \omega_y &= (\delta u / \delta z - \delta w / \delta x) \div 2 \\ \omega_z &= (\delta u / \delta y - \delta v / \delta x) \div 2 \end{aligned}$$

Dari perbincangan di atas dapat dilihat bahawa parameter deformasi adalah suatu elemen yang boleh memperjelaskan mengenai deformasi yang berlaku

pada sesuatu jasad. Penyelesaian untuk komponen parameter deformasi boleh didapati melalui maklumat anjakan yang diperolehi dari analisis geometri. Oleh yang demikian, apabila analisis geometri telah diperolehi maka langkah yang perlu disusuli ialah menyelesaikan perhitungan parameter deformasi. Dalam perbincangan mengenai analisa deformasi, prosidur bagi menghitung parameter deformasi dirujuk sebagai permodelan deformasi.

3.5 Permodelan Deformasi

Prosidur permodelan deformasi bertujuan untuk mengaitkan deformasi yang berlaku dengan satu model matematik yang bersesuaian. Permodelan ini melibatkan masalah berikut;

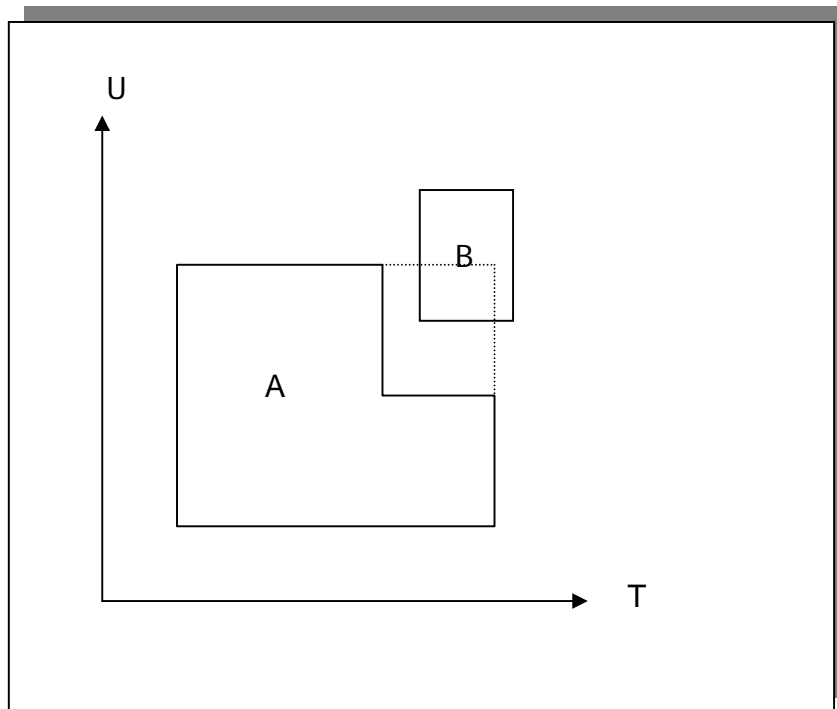
- i. mengenal pasti jenis model bagi deformasi tersebut
- ii. menyelesaikan penganggaran bagi parameter deformasi
- iii. memilih model berserta parameter deformasi yang terbaik

Permodelan deformasi sesuatu objek atau jasad diselesaikan dengan berasaskan kepada teori elastisiti. Teori ini menyebut bahawa deformasi yang wujud boleh dikategorikan kepada tiga kelas utama iaitu (Chrzanowski et.al, 1986);

- i. *Single point movement* atau *rigid body displacement*
- ii. *Homogenous strain*
- iii. Gabungan *rigid body displacement* + *different homogenous strain*

3.5.1 Deformasi model *single point movement* atau *rigid body displacement*

Ilustrasi deformasi kategori *single point movement* atau *rigid body displacement* ditunjukkan oleh Rajah 3.1.



Rajah 3.1: *Single point movement* atau *rigid body displacement*

Single point movement (SPM) ditakrif sebagai wujud bila mana deformasi pada jaringan A dikesan berlaku hanya pada satu titik secara tunggal iaitu B. Titik-titik lain pada jaringan A didapati tidak mengalami sebarang anjakan yang boleh dikategori sebagai deformasi.

Rigid body displacement (RBD) dikatakan wujud pada jaringan A apabila sebilangan titik teranjak secara berkumpulan dalam satu blok B. Oleh itu RBD mempunyai ciri yang serupa seperti mana SPM iaitu berlaku pergerakan pada sebahagian jaringan A secara tunggal. Yang membezakan cuma dalam kes SPM deformasi melibatkan hanya satu titik sementara RBD melibatkan lebih dari satu titik.

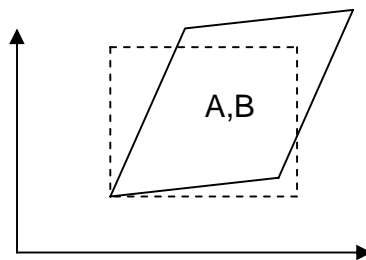
Model matematik yang digunakan bagi deformasi model *single point movement* atau *rigid body displacement* adalah (Chrzanowski et.al, 1986);

$$\begin{array}{lcl} U_A & = & 0 \quad ; \quad V_A = 0 \\ U_B & = & a_0 \quad ; \quad V_B = b_0 \end{array} \quad) \quad 3.5$$

Dalam persamaan 3.5, fungsi anjakan deformasi (U_A dan V_A) dinyatakan sebagai sifar kerana deformasi dikatakan sebagai tidak wujud pada blok A. Deformasi yang berlaku adalah pada blok B, maka fungsi anjakan mewakili U_B dan V_B dinyatakan sebagai a_0 dan b_0 . Parameter deformasi a_0 dan b_0 dirujuk juga sebagai parameter translasi.

3.5.2 Deformasi model *homogenous strain*

Deformasi berkemungkinan juga berlaku dalam satu kategori yang dipanggil sebagai *homogenous strain*. Rajah 3.2 menunjukkan gambaran bagi deformasi yang dimodel sebagai *homogenous strain*.



Rajah 3.2 *Homogenous strain*

Homogenous strain ditakrif sebagai wujud bila mana deformasi pada jaringan A dikesan berlaku dalam satu blok yang sama seragam secara menyeluruh. Titik-titik pada jaringan A telah dikesan berubah kedudukannya membentuk blok baru

iaitu B. Satu lagi ciri dalam *homogenous strain* ialah wujudnya elemen putaran yang mengubah orientasi blok asal A kepada blok B.

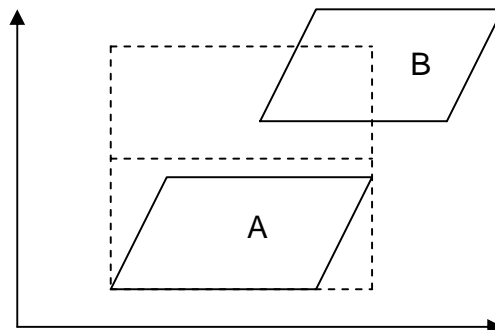
Bagi permodelan deformasi untuk model *homogenous strain* model matematik yang digunakan adalah (Chrzanowski et.al, 1986);

$$\begin{aligned} U &= \varepsilon_x X + \varepsilon_{xy} y - \omega y \\ V &= \varepsilon_{xy} X + \varepsilon_y y + \omega x \end{aligned} \quad 3.6$$

Berdasarkan persamaan 3.6, dapat diperhatikan bahawa permodelan defomasi bagi homogenous strain melibatkan parameter deformasi tegasan normal (ε_x , ε_y), komponen tegasan ricih, ε_{xy} , dan elemen putaran ω . Nilai x dan y adalah koordinat bagi titik dalam jaringan deformasi berkenaan.

3.5.3 Gabungan *rigid body displacement* + *different homogenous strain*

Satu lagi kategori dalam deformasi dirujuk sebagai model gabungan *rigid body displacement* dan *different homogenous strain*. Dalam kes ini, deformasi yang berlaku dikesan padanan modelnya sebagai kombinasi kepada dua kes sebelum ini iaitu gabungan *rigid body displacement* dan *homogenous strain*.



Rajah 3.3: Gabungan *rigid body displacement* dan *homogenous strain*

Rajah 3.3 menunjukkan ilustrasi deformasi yang dimodel sebagai gabungan *rigid body displacement* dan *different homogenous strain*.

Deformasi yang ditunjukkan oleh Rajah 3.3. mempamirkan bahawa pergerakan yang berlaku dalam jaringan boleh dipecahkan kepada dua blok iaitu A dan B, kedua-dua blok tersebut dalam bentuk homogenous strain. Deformasi dengan ciri yang sedemikian dikatakan sebagai deformasi secara ketidakselanjaraan atau *discontinuity* di mana wujud satu garisan pemisah yang mengasingkan antara blok A dengan blok B.

Selain *discontinuity*, satu lagi ciri yang berlaku adalah kewujudan *rigid body displacement* di mana blok B telah bergerak dan berpisah dari blok A. Dapat juga diperhatikan bahawa blok B mengalami deformasi yang secara linearnya adalah berlainan berbanding deformasi blok A.

Model matematik bagi permodelan deformasi bagi kes gabungan *rigid body displacement* dan *different homogenous strain* diberikan sebagai (Chrzanowski et.al, 1986);

$$\begin{aligned} U_A &= \epsilon_{x A} X + \epsilon_{xy A} Y - \omega_A Y \\ V_A &= \epsilon_{xy A} X + \epsilon_{y A} Y + \omega_A Y \end{aligned} \quad 3.7a$$

dan,

$$\begin{aligned} U_B &= a_0 + \epsilon_{x B} (X-x_0) + \epsilon_{xy B} (Y-y_0) - \omega_B (Y-y_0) \\ V_B &= b_0 + \epsilon_{xy B} (X-x_0) + \epsilon_{y B} (Y-y_0) + \omega_B (Y-y_0) \end{aligned} \quad 3.7b$$

Parameter deformasi yang terlibat dalam persamaan 3.7a dan 3.7b adalah sama seperti mana yang telah dibincangkan dalam persamaan 4.2. Selanjutnya, x_0 dan y_0 adalah koordinat bagi sebarang titik pada blok B.

3.6 Rumusan

Sebagai rumusan bolehlah dirumuskan bahawa permasalahan yang cuba diselesaikan dalam analisa deformasi melibatkan tiga aspek. Pertama adalah untuk mengenal pasti sama ada wujud deformasi pada objek yang dikaji. Kedua adalah untuk memodelkan deformasi yang berlaku mengikut jenisnya yang bersesuaian. Ketiga mengenal pasti parameter deformasi yang berpadan serta penganggaran mereka berdasarkan model yang dipilih.

Selanjutnya, model matematik yang digunakan dalam permodelan deformasi ditunjukkan sebagai mempunyai hubung kait dengan tiga komponen deformasi dengan parameter mereka masing-masing iaitu;

	Komponen deformasi	Parameter deformasi
1.	Translasi	Parameter translasi (a_o , b_o)
2.	Putaran atau rotasi	Parameter rotasi ω
3.	Deformasi tulen	Normal strain (ϵ_x , ϵ_y) Shearing strain (ϵ_{xy})

BAB 4

PERMODELAN DEFORMASI MENGGUNAKAN DATA GEOTEKNIK

4.1 Pendahuluan

Bab ini menghuraikan kaedah bagi menyelesaikan permodelan deformasi menggunakan data geoteknik. Maklumat mengenai koordinat spatial merupakan satu aspek penting dalam analisa geometri dan permodelan deformasi. Keperluan kepada maklumat koordinat spatial mengwujudkan satu perbezaan yang nyata jika dibandingkan data geodetik dengan data geoteknik. Pengukuran secara geodetik membekalkan data yang boleh digunakan untuk memperolehi koordinat spatial. Sebagai contoh, cerapan sudut, bearing dan jarak boleh menyelesaikan koordinat 2D atau 3D.

Bagi kes pemakaian peralatan geoteknik, perolehan datanya adalah dalam bentuk bukan koordinat. Maklumat yang diperolehi adalah berbagai bergantung kepada jenis peralatan yang digunakan. Sebagai contoh, extensometer memberikan data mengenai perbezaan jarak; tiltmeter memberikan maklumat kesengetan dan kecondongan. Maklumat seperti perbezaan jarak, kesengetan dan kecondongan belum boleh digunakan terus untuk menganalisa dan memodel deformasi kerana mereka bukan dalam bentuk koordinat spatial. Oleh yang demikian, perkara asas yang perlu dilakukan ialah merumuskan data geoteknik kepada bentuk koordinat spatial menggunakan model matematik yang bersesuaian.

4.2 Model matematik asas permodelan deformasi

Chrzanowski et.al, 1986 menegaskan bahawa pada amalnya ukur deformasi dilaksanakan secara diskret iaitu dengan melibatkan pengukuran di beberapa titik yang dipilih. Analisa deformasi yang disempurnakan adalah dalam bentuk analisis geometri menunjukkan corak anjakan yang berlaku pada titik diskret berkenaan seperti mana pers. 3.1 iaitu;

$$d(x, y, z; t-t_0) = \begin{bmatrix} u(x, y, z; t-t_0) \\ v(x, y, z; t-t_0) \\ w(x, y, z; t-t_0) \end{bmatrix}$$

Bagi tujuan pemprosesan data bukan geodetik untuk analisa deformasi model matematik berikut akan digunakan (Chen,1983);

$$dx = Bc$$

dimana,

d	=	vektor deformasi
x	=	elemen koordinat jaringan
B	=	matrik cerapan
c	=	parameter yang tidak diketahui (parameter deformasi)

Pembentukan matrik cerapan B, diperlukan berdasarkan kepada nilai cerapan yang diperolehi melalui peralatan geoteknik. Untuk itu, nilai cerapan yang diperolehi perlu diubah dan diklasifikasikan mengikut paksi koordinat yang telah ditetapkan seperti paksi X, paksi Y dan paksi Z. Oleh itu, peralatan geoteknik yang mampu memberikan data tersebut akan digunakan bagi tujuan cerapan bagi penentuan deformasi.

4.3 Parameter deformasi dari data geodetik dan geoteknik

Data yang telah diperoleh akan diproses bagi menentukan sama ada deformasi ke atas objek berlaku atau tidak. Untuk itu, model matematik yang berkaitan akan digunakan bagi mengaitkan data cerapan dengan parameter deformasi yang ingin ditentukan. Berikut merupakan model matematik penentuan deformasi menggunakan data geoteknik (Secord, 1985);

Model Deformasi, dx

$$\mathbf{dx} = \mathbf{Bc}$$

dimana,

- d = vektor deformasi
- x = elemen koordinat jaringan
- B = matrik cerapan
- c = parameter yang tidak diketahui (parameter deformasi)

Selanjutnya, komponen dx dalam persamaan di atas boleh ditulis sebagai,

$$\mathbf{dx} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{Bc}$$

di mana u, v dan w adalah parameter deformasi seperti mana berikut,

Parameter Deformasi

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3z$$

$$w = c_0 + c_1x + c_2y + c_3z$$

Nilai u, v, w : parameter deformasi

Nilai x, y, z : nilai cerapan

Parameter tidak diketahui, c : $[a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3]^T$

Oleh itu,

Bc =

$$\begin{vmatrix} 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{vmatrix}$$

Walau bagaimana pun, model deformasi yang dipaparkan di atas adalah model keseluruhan bagi penentuan deformasi. Dalam kajian kes ini, beberapa perkara seperti pembentukan matrik cerapan dan nilai parameter deformasi perlu diambil kira. Untuk tujuan itu, beberapa jenis persamaan cerapan akan digunakan bagi membentuk matrik-matrik yang diperlukan seperti berikut :

4.3.1 Koordinat (geodetik)

Data yang diperoleh dalam bentuk koordinat biasanya dihasilkan daripada peralatan geodetik seperti total station atau Global Positioning System (GPS).

Untuk tujuan ini, cerapan perlu dilakukan dalam dua masa yang berbeza bagi membolehkan pengenalpastian perbezaan antara data cerapan yang akan digunakan bagi penentuan deformasi. Berikut merupakan persamaan cerapan yang akan digunakan bagi kes data cerapan berbentuk koordinat:

$$r(t) + v(t) = r(t_0) + B(x_p, y_p, z_p)c \quad (4.1.1)$$

dimana,

$r(t)$	=	koordinat titik P pada masa t
$r(t_0)$	=	koordinat titik P pada masa t_0
A	=	matrik reka bentuk cerapan
c	=	parameter deformasi yang tidak diketahui
$v(t)$	=	selisih rawak

4.3.2 Perbezaan koordinat (geodetik/geoteknik)

Sama seperti penggunaan persamaan cerapan bagi koordinat (pers. 4.1.1), persamaan cerapan bagi kaedah perbezaan koordinat boleh melibatkan data sama ada dalam bentuk geodetik atau geoteknik. Bagi kes data geodetik persamaan cerapan boleh ditakrifkan seperti berikut:

$$\Delta x(t) - \Delta x(t_0) + v(t) = \{ B(x_q, y_q, z_q) - B(x_p, y_p, z_p) \} c \quad (4.1.2)$$

dimana,

Δx	=	$(dx, dy, dz)^T$
dx	=	$x_q - x_p$
dy	=	$y_q - y_p$
dz	=	$z_q - z_p$
A	=	matrik reka bentuk cerapan
c	=	parameter deformasi yang tidak diketahui
$v(t)$	=	selisih rawak

Beza antara kaedah koordinat dengan kaedah perbezaan koordinat ialah kaedah koordinat melibatkan cerapan data di satu titik sahaja, manakala kaedah perbezaan koordinat melibatkan dua titik. Seterusnya, perbezaan vektor antara dua titik cerapan (eg., titik Q dan titik P) bagi dua epok berlainan akan digunakan bagi menentukan sama ada deformasi berlaku atau tidak.

Bagi kes cerapan menggunakan peralatan geoteknik, dua peralatan diperlukan bagi mendapatkan parameter deformasi. Peralatan yang digunakan ialah alat aras dan pendulum, dimana alat aras akan memberikan parameter deformasi, w (1 dimensi) dan pendulum akan memberikan parameter deformasi, u dan v (2 dimensi). Berikut merupakan persamaan cerapan bagi alat aras:

$$\Delta h(t) - \Delta h(t_0) + v(t) = \{ B_w(x_q, y_q, z_q) - B_w(x_p, y_p, z_p) \} c$$

Untuk melengkapkan parameter deformasi bagi persamaan cerapan di atas, persamaan cerapan bagi pendulum seperti berikut digunakan:

$$\Delta x(t) - \Delta x(t_0) + v(t) = \{ B_u(x_q, y_q, z_q) - B_u(x_p, y_p, z_p) \} c$$

$$\Delta y(t) - \Delta y(t_0) + v(t) = \{ B_v(x_q, y_q, z_q) - B_v(x_p, y_p, z_p) \} c$$

4.3.3 Jarak (geoteknik)

Bagi tujuan menentukan sebarang perubahan dalam bentuk jarak, Δs , persamaan cerapannya adalah seperti berikut (Secord, 1985);

$$\Delta s = \cos \beta \cos \alpha (u_q - u_p) + \cos \beta \sin \alpha (v_q - v_p) + \sin \beta (w_q - w_p)$$

di mana,

β	=	nilai zenith alat
α	=	nilai bearing alat dari RO
u, v, w	=	parameter deformasi

Bagi kajian kes projek ini, penentuan perubahan dalam bentuk jarak adalah menggunakan peralatan geoteknik yang dipanggil extensometer. Persamaan cerapan di atas adalah terlalu umum, bagi memudahkan penggunaannya, ia telah diringkaskan seperti berikut:

$$S(t) - S(t_0) + v(t) = (\cos\beta \cos\alpha \quad \cos\beta \sin\alpha \quad \sin\beta) \{ B(x_q, y_q, z_q) - B(x_p, y_p, z_p) \} c$$

Atau pun dalam bentuk berikut,

$$S(t) - S(t_0) + v(t) = (\cos\beta \cos\alpha \quad \cos\beta \sin\alpha \quad \sin\beta) \{ B_q - B_p \} c$$

4.3.4 Kecondongan (geoteknik)

Bagi menentukan parameter kecondongan, w , persamaan cerapannya adalah lebih mudah berbanding persamaan lain kerana ia hanya melibatkan satu parameter deformasi sahaja. Persamaan cerapannya adalah seperti berikut (Secord, 1985);

$$l(t) - l(t_0) + v(t) = A_\beta \frac{\partial}{\partial(x,y,z)} B_w c$$

$$= (\sin\alpha \quad \cos\alpha \quad 0) \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & B_w c \\ \frac{\partial}{\partial y} & B_w c \\ \frac{\partial}{\partial z} & B_w c \end{vmatrix}$$

4.3.5 Ketegangan (geoteknik)

Persamaan cerapan bagi ketegangan adalah hampir serupa seperti persamaan cerapan bagi perubahan dalam bentuk jarak. Tidak seperti kecondongan, persamaan cerapan bagi ketegangan melibatkan semua parameter deformasi seperti berikut (Secord, 1985);

$$S(t) - S(t_0) + v(t) = (\sin\beta \sin\alpha \quad \sin\beta \cos\alpha \quad \cos\beta) \{B_q - B_p\}c$$

di mana,

β	=	bacaan zenit alat
α	=	bacaan bearing alat dari RO
B	=	matrik reka bentuk cerapan
$v(t)$	=	selisih rawak

4.4 Pengelasan Deformasi Tipikal

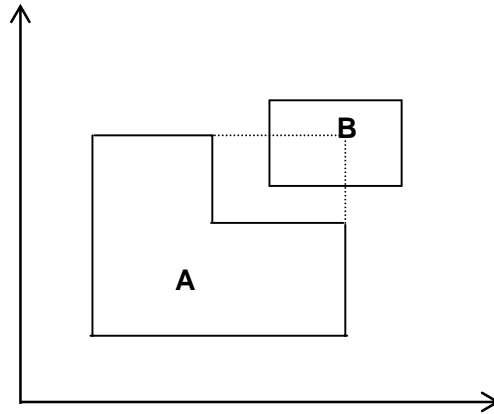
Kelima-lima kaedah persamaan cerapan di atas boleh dibahagikan kepada tiga pengelasan deformasi tipikal iaitu;

- tipikal 1 (pergerakan satu titik),
- tipikal 2 (ketegangan seragam seluruh blok) dan
- tipikal 3 (dua blok mempunyai ketegangan seragam sementara satu blok bergerak ke arah yang lain).

Cerapan yang dibuat mungkin akan menghasilkan salah satu daripada tipikal di atas. Oleh itu, analisis akan dibuat kepada data yang diproses bagi menentukan padanan jenis tipikal mana yang berlaku. Berikut merupakan matrik reka bentuk cerapan, B , dan parameter deformasi yang terbentuk bagi setiap tipikal di atas.

4.4.1 Deformasi Tipikal 1

-Deformasi jenis *tipikal 1* (pergerakan satu titik)



$$\begin{aligned} dx_A &= 0, & dy_A &= 0, & dz_A &= 0 \\ dx_B &= a_0, & dy_B &= b_0, & dz_B &= c_0 \end{aligned}$$

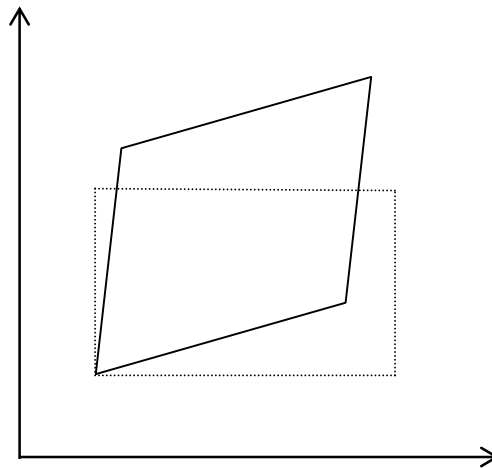
Apabila dinyatakan dalam bentuk matrik,

$$d_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_B = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx_B \\ dy_B \\ dz_B \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad c = \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & c_0 \end{bmatrix}$$

4.4.2 Deformasi Tipikal 2

- deformasi jenis *tipikal 2* (ketegangan seragam seluruh blok)



$$u = a_1x + a_2y + a_3z$$

$$v = b_1x + b_2y + b_3z$$

$$w = c_1x + c_2y + c_3z$$

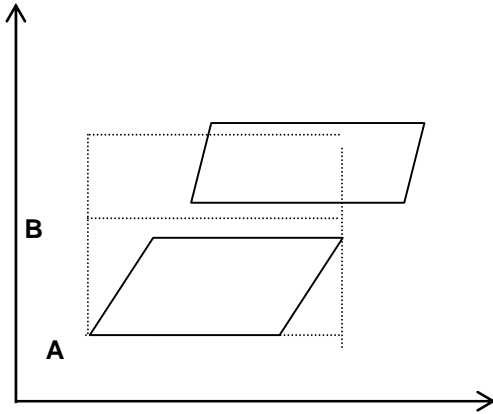
Dinyatakan dalam bentuk matrik,

$$d = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & y & z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & b_1 & b_2 & b_3 & c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

4.4.3 Deformasi Tipikal 3

- deformasi jenis *tipikal 3* (dua blok mempunyai ketegangan seragam sementara satu blok bergerak ke arah yang lain)



$$dx_A = a_1x + a_2y + a_3z$$

$$dy_A = b_1x + b_2y + b_3z$$

$$dz_A = c_1x + c_2y + c_3z$$

$$dx_B = a_0 + f_1x + f_2y + f_3z$$

$$dy_B = b_0 + g_1x + g_2y + g_3z$$

$$dz_B = c_0 + h_1x + h_2y + h_3z$$

Dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai,

$$d_A = \begin{bmatrix} dx_A \\ dy_A \\ dz_A \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & y & z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & b_1 & b_2 & b_3 & c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

$$d_B = \begin{bmatrix} dx_B \\ dy_B \\ dz_B \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} a_0 & f_1 & f_2 & f_3 & b_0 & g_1 & g_2 & g_3 & c_0 & h_1 & h_2 & h_3 \end{bmatrix}$$

Setelah pembentukan matrik cerapan (matrik A) dan parameter deformasi dikenal pasti, maka hitungan pelarasan akan dilakukan ke atas data cerapan bagi menentukan samada deformasi berlaku atau sebaliknya.

BAB 5

REKA BENTUK & PEMBANGUNAN PERISIAN

5.1 Pendahuluan

Setelah membincangkan mengenai pemakaian peralatan bukan geodetik khususnya peralatan geoteknik untuk kerja ukur deformasi dan juga huraian tentang model matematik yang boleh diguna pakai bagi menganalisa deformasi maka berikutnya diteruskan pula dengan pembangunan perisian yang perlu untuk digunakan dalam analisa berkenaan.

Satu program komputer menggunakan bahasa fortran bagi menganalisa deformasi menggunakan cerapan geoteknik telah dibangunkan. Perbincangan di Bab ini difokuskan kepada reka bentuk dan algoritma yang dipakai dalam membangunkan program komputer berkenaan. Dalam pemakaiannya, deformasi geodetik yang berlaku dibahagikan kepada tiga pengelasan utama seperti mana berikut;

- Tipikal 1 (pergerakan satu titik)
- Tipikal 2 (pergerakan seragam keseluruhan blok)

- Tipikal 3 (dua blok mempunyai ketegangan seragam sementara satu blok lagi bergerak ke arah lain)

Oleh itu, program analisa deformasi yang dihasilkan mempunyai tiga pilihan iaitu aplikasi jenis tipikal 1, tipikal 2 atau tipikal 3. Selanjutnya, bagi menentukan kesesuaian sebenar, setiap model tipikal tersebut akan melalui ujian statistik global. Ujian berkenaan akan mengesahkan deformasi jenis mana yang betul-betul sesuai untuk digunakan.

5.2 Fail Data Input

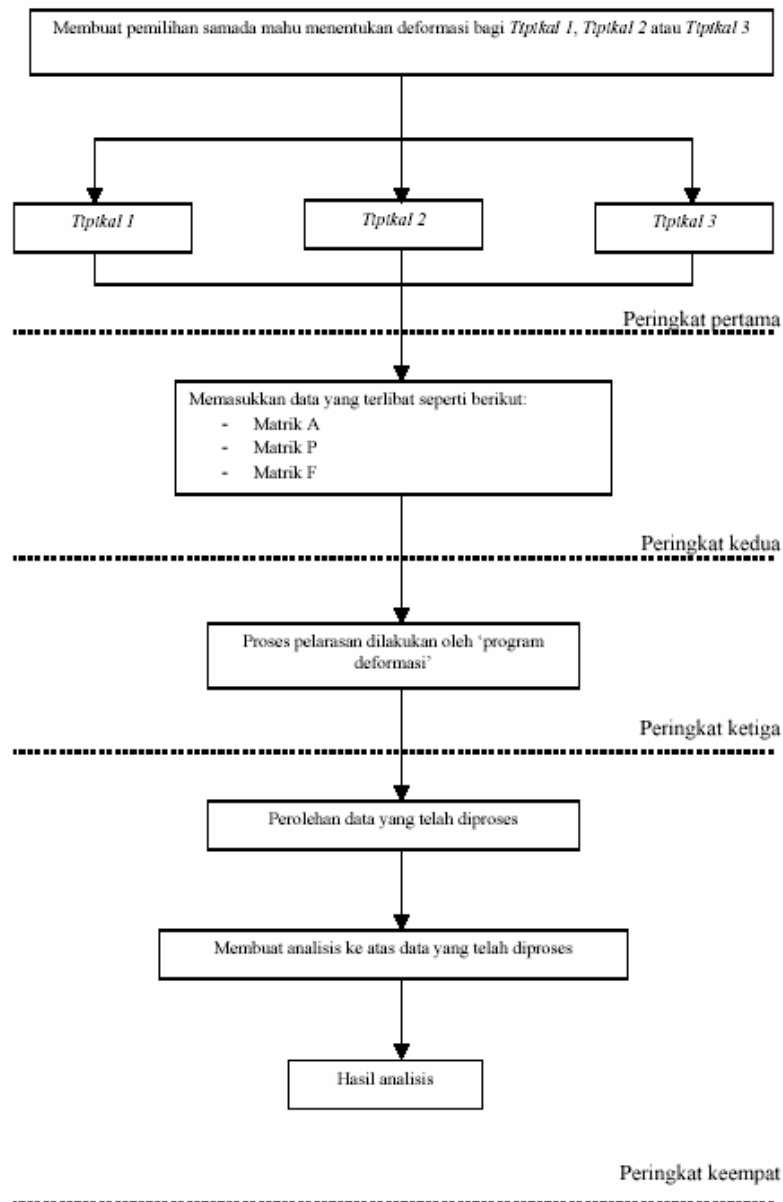
Oleh kerana program analisa deformasi yang dihasilkan menggunakan data yang diperolehi daripada penggunaan kaedah geodetik dan geoteknik, maka pembentukan matrik yang terlibat adalah bergantung sepenuhnya terhadap jenis data dan persamaan cerapan yang digunakan seperti berikut:

- Koordinat (geodetik)
- Perbezaan koordinat (geodetik/geoteknik)
- Jarak (geoteknik)
- Kecondongan (geoteknik)
- Ketegangan (geoteknik)

Pembentukan setiap matriks dibuat menurut susunan data yang digunakan bermula dengan data koordinat, disusuli data-data lain iaitu perbezaan koordinat, jarak, kecondongan dan akhir sekali data ketegangan. Kaedah kemasukan data juga bergantung kepada jenis tipikal yang ingin digunakan. Sebagai contoh, tipikal 1 mempunyai 3 parameter anu, tipikal 2 melibatkan 9 parameter anu dan tipikal 3 pula mempunyai sejumlah 21 parameter anu.

5.3 Reka bentuk Program

Data input geodetik dan geoteknik akan diproses mengikut pengelasan deformasi tipikal 1, tipikal 2 atau tipikal 3 menerusi program deformasi yang telah dibangunkan. Rajah 5.1 berikut merupakan cartalir yang menerangkan bagaimana program deformasi yang dibangunkan berfungsi:



Rajah 5.1: Carta alir program analisa deformasi yang dibangunkan
(Sumber: Mohd Azwan Abbas, 2004)

5.4 Proses Peringkat Pertama

Seperti yang telah diterangkan di Bab 4, deformasi boleh berlaku dalam tiga keadaan iaitu pergerakan satu titik (Tipikal 1), pergerakan seragam seluruh blok (Tipikal 2) dan dua blok mempunyai ketegangan seragam sementara satu blok bergerak ke arah yang lain (Tipikal 3).

Oleh itu, program analisa deformasi yang dibangunkan ini memberikan pilihan kepada pengguna sama ada mahu menentukan deformasi bagi tipikal 1, tipikal 2 atau tipikal 3. Data yang diperoleh pada akhir pemprosesan akan dianalisis bagi menentukan deformasi tipikal mana yang berlaku. Bagi tujuan membuat pilihan, program analisa deformasi ini membenarkan pengguna untuk membuat pilihan seperti berikut:

- Butang '1', bagi tipikal 1
- Butang '2', bagi tipikal 2
- Butang '3', bagi tipikal 3

Perbezaan antara setiap tipikal di atas ialah bilangan parameter anu yang berbeza seperti mana berikut:

- Tipikal 1 mempunyai 3 parameter anu
- Tipikal 2 mempunyai 9 parameter anu
- Tipikal 3 mempunyai 21 parameter anu

Untuk keterangan yang lebih jelas mengenai parameter yang terlibat sila rujuk perbincangan di Bab 4.

5.5 Proses Peringkat Kedua

Berdasarkan kepada pilihan yang dibuat di peringkat pertama, maka setiap proses kemasukan data adalah bergantung kepada jenis tipikal deformasi. Walau bagaimana pun, program analisa deformasi yang dibangunkan ini, pengguna dikehendaki memasukkan bilangan cerapan bagi setiap jenis data serta bilangan parameter yang terlibat (bergantung kepada jenis tipikal deformasi yang dipilih).

Bilangan cerapan pula terbahagi kepada 5 bahagian utama mengikut jenis data seperti berikut:

- Koordinat (geodetik)
- Perbezaan koordinat (geodetik/geoteknik)
- Jarak (geoteknik)
- Kecondongan (geoteknik)
- Ketegangan (geoteknik)

Lima jenis data yang disenaraikan di atas hanya terlibat bagi pilihan tipikal 2 dan tipikal 3 sahaja. Manakala bagi tipikal 1 melibatkan hanya jenis data koordinat berikutan sifat model matematikanya.

Data yang lain seperti matriks A, matriks P dan matriks F dipanggil terus daripada fail *NotePad* atau *WordPad*. Oleh itu, pengguna perlu memasukkan data matriks berkenaan ke fail *NotePad* atau *WordPad* secara berasingan.

Selanjutnya, kesemua matriks yang terlibat akan digabungkan dalam satu matriks sahaja. Sebagai contoh, matriks A bagi kesemua jenis data cerapan akan digabungkan menjadi satu matriks A. Begitu jugalah kesnya dengan matriks P dan matriks F. Oleh itu, nilai yang dihasilkan nanti merupakan gabungan data kesemua jenis cerapan sama ada data geodetik mahu pun data geoteknik.

5.6 Proses Peringkat Ketiga

Proses pelarasan yang dilakukan ialah kedah persamaan cerapan model linear memandangkan data yang dicerap merupakan data linear. Berikut merupakan kaedah pelarasan yang digunakan di dalam program analisa deformasi yang dibangunkan:

- i. $F = AX$ Model matematik
- ii. ${}_nV_I = {}_nA_u {}_uX_I - {}_nF_I$ Persamaan cerapan
- iii. Pembentukan matriks reka bentuk A dan matriks pemberat P.
- iv. $x = (ATPA)^{-1} \cdot ATPF$ Parameter Pembetulan
- v. $V = AX - F$ Vektor reja
- vi. $\sigma_v^2 = \frac{V^T P V}{n-u}$ Varians Aposteriori
- vii. $\Sigma x = \sigma_v^2 * (A^T P A)^{-1}$ Varians – Kovarians

5.7 Proses Peringkat Keempat

Langkah ini merupakan peringkat akhir program untuk proses menganalisa deformasi. Tugas di peringkat ini meliputi hitungan pelarasan bagi menyelesaikan penganggaran parameter deformasi berserta matrik varians kovariansnya.

5.8 Contoh Pemakaian

Bagi membolehkan program ini diguna pakai pengguna haruslah menginstall terlebih dulu kompiler *Fotran Power Station 4.0*. Sebagai satu contoh pemakaiannya, program analisa deformasi ini telah diuji keberkesanannya

dengan menggunakan data simulasi yang diwujudkan berdasarkan nilai cerapan yang telah dibuat oleh Chen Yong Qi (melibatkan data linear):

$$a1 = 0.00513672$$

$$a2 = - 0.00512818$$

$$a3 = 0.00000000$$

$$b1 = 0.00000000$$

$$b2 = 0.00152345$$

$$b3 = 0.00000000$$

$$c1 = 0.00993372$$

$$c2 = - 0.00668839$$

$$c3 = 0.00000000$$

Data simulasi di atas merupakan parameter yang terdapat untuk jenis tipikal 2 iaitu bagi pengujian pergerakan secara keseluruhan. Oleh itu, analisis yang dilakukan hanya melibatkan ujian jenis tipikal 2 sahaja. Contoh yang melibatkan pemilihan jenis tipikal 2 ini dipilih kerana ianya merangkumi kesemua formula dan model matematik yang melibatkan semua jenis data cerapan – iaitu meliputi koordinat (peralatan geodetik); perbezaan koordinat (alat geodetik/geoteknik); jarak (alat geoteknik); kecondongan (alat geoteknik) dan ketegangan (alat geoteknik).

Kesemua jenis data di atas akan membentuk setiap persamaan cerapan masing-masing yang berbeza antara satu sama lain (seperti yang dinyatakan di dalam Bab 3). Seterusnya, matrik A dan matrik F bagi setiap persamaan cerapan akan digabungkan bagi menghasilkan sembilan parameter tidak diketahui yang sama atau hampir sama seperti data simulasi tersebut.

Bagi membentuk matrik F (matrik cerapan), terdapat beberapa data simulasi yang perlu diwujudkan selain daripada parameter tidak diketahui seperti di atas, iaitu data koordinat, nilai zenith dan bearing bagi alat yang digunakan. Oleh itu,

setiap nilai cerapan akan diperoleh dan seterusnya matrik F dapat dibentuk. Bagi kes ini, matrik pemberat yang digunakan ialah dalam bentuk matrik identiti.

Sebagai contoh keputusan yang diperolehi dari kes simulasi di atas di tunjukkan oleh jadual 5.1 seperti mana berikut;

Parameter Anu	Data sedia ada	Data selepas pelarasan (program deformasi)	Perbezaan
a_1	0.00513672	0.00513646	0.00000026
a_2	0.00512818	0.00512665	0.00000153
a_3	0.00000000	0.00000005	- 0.00000005
b_1	0.00000000	- 0.00001390	0.00001390
b_2	0.00152345	0.00141609	0.00010736
b_3	0.00000000	0.00000389	- 0.00000389
c_1	0.00993372	0.00993371	0.00000001
c_2	- 0.00668839	- 0.00668843	0.00000004
c_3	0.00000000	0.00000000	0.00000000

Jadual 5.1: Perbandingan keputusan pelarasan menggunakan program yang dibangunkan berbanding data sedia ada

Berdasarkan kepada jadual 5.1 di atas, didapati penyelesaian yang diperolehi melalui pemakaian program yang dibangunkan sebagai berjaya. Keputusan akhir yang diperolehi mewakili setiap parameter anu adalah sepadan dengan data simulasi asal yang digunakan.

Oleh itu, analisis yang dilakukan terhadap program analisa deformasi menunjukkan bahawa ianya boleh diguna pakai bagi penentuan parameter deformasi yang melibatkan data cerapan seperti yang telah dinyatakan.

BAB 6

KESIMPULAN & CADANGAN

6.1 Pendahuluan

Analisa deformasi geodetik merupakan suatu analisis dengan skop yang luas serta memerlukan prosedur hitungan yang diselesaikan dengan menggunakan berbagai kaedah khusus. Pada masa kini, analisa deformasi geodetik hanya memanfaatkan data cerapan yang diperolehi menggunakan peralatan geodetik. Kewujudan berbagai jenis peralatan geoteknik seharusnya dimanfaatkan lebih-lebih lagi dalam kerja ukur deformasi yang dilakukan terhadap struktur seperti empangan, jambatan dan sebagainya.

Perbincangan dalam laporan ini menghuraikan mengenai pemakaian peralatan bukan geodetik khususnya peralatan geoteknik untuk kerja ukur deformasi. Berdasarkan dari berbagai laporan yang dipetik dari kertas kerja seminar, artikel di jurnal dan sebagainya ternyata peralatan geoteknik seperti extensometer, tiltmeter dan sebagainya telah sekian lama digunakan dan dimanfaatkan untuk tujuan analisa deformasi.

6.2 Kesimpulan

Secara ringkasnya dapatan kajian ini mengutarakan beberapa kesimpulan iaitu;

- i). Analisa deformasi dengan kaedah geodetik boleh memanfaatkan data cerapan yang diperolehi menggunakan peralatan geoteknik seperti extensometer, tiltmeter dan sebagainya.
- ii). Permasalahan dalam menganalisa deformasi menurut kaedah geodetik berasaskan cerapan peralatan geoteknik boleh diselesaikan dengan menggunakan model matematik yang bersesuaian.
- lii). Contoh kerja yang disertakan telah mempamerkan bahawa pemakaian data geoteknik boleh diimplemen dalam menyelesaikan analisa deformasi bagi mendapatkan anggaran parameter deformasi menurut pengelasan yang digolong sebagai tipikal 1, tipikal 2 dan tipikal 3.

6.3 Cadangan

Sebagai mengakhiri laporan berikut dikemukakan beberapa cadangan untuk kajian lanjutan;

- i). Memandangkan contoh kerja yang ditunjukkan dalam laporan ini adalah berdasarkan kepada data simulasi maka kajian susulan perlulah diusahakan menggunakan data cerapan sebenar.
- ii). Satu kelemahan yang terdapat dalam program analisa deformasi yang dibangunkan ialah ia memerlukan berbagai fail data input yang disediakan secara berasingan. Satu pembaikan dicadangkan supaya segala data input yang diperlukan disusun dalam satu fail sahaja untuk mengurangkan kekeliruan di pihak pengguna.

iii). Satu lagi perbaikan yang boleh diusahakan ialah menghasilkan program analisa deformasi yang bersifat mesra-pengguna dan beroperasi dalam environmen window.

SENARAI RUJUKAN

Avella, S., (1993). "An analysis of a worldwide status of monitoring and analysis of dam deformation." M Eng Report, Dept of Surveying Engineering Technical Report No 167, University of New Brunswick, Canada, 272 pp.

Chen, Yong-qi (1983). "Analysis of deformation surveys: A generalized method." Dept of Surveying Engineering Technical Report No 94, University of New Brunswick, Canada.

Chrzanowski, A., Y Q Chen, J M Secord, G A Thompson & Z Wroblewicz (1988). "Integration of geotechnical and geodetic observations in the geometrical analysis of deformation at the Mactaquac generating station." Proceedings of the FIG 5th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Fredericton, pp. 156-169.

Chrzanowski, A. (1986). "Geotechnical and other non-geodetic methods in deformation measurement." Proceedings of Workshop on Deformation Measurements. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., October, pp. 112-152.

Chrzanowski, A., Y Q Chen & J M Secord (1986). "Geometrical analysis of deformation surveys." Proceedings of Workshop on Deformation Measurements. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., October, pp. 170-202.

Ding, X. L., J. H. Yin, Y. W. Yang, D. F. Huang & Y. Q. Chen (2003). "Combined multi-antenna GPS and geotechnical Instruments for landslide monitoring: Test results on a Loose Fill Slope." Paper presented at the 7th Southeast Asia Survey Congress, Hong Kong, 3 – 7 November, pp. 7 pages.

FIG - International Federation of Surveyors, (1982). "Recommendations." Proceedings of the FIG 3rd International Symposium on Deformation Measurements, Budapest, pp. xix – xx.

Mohd Azwan Abbas (2004). Pemakaian dan Pemprosesan Data Geoteknik Dalam Kerja Ukur Deformasi. Projek Sarjana Muda, Fakulti Kejuruteraan & Sains Geoinformasi, UTM Skudai.

Pretorius, C. J., W. F. Schmidt, C. S. van Staden & K. Egger (2001). "The extensive geodetic system used for the monitoring of a 185 metre high arch dam in South Africa." Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, pp. 203-213.

Rauhut, A. C., (1987). "Integrated deformation analysis of the Olympic Oval, Calgary." UCSE Reports No 20025, Department of Surveying Engineering, The University of Calgary.

Teskey, B. F., (1986). "Integrated analysis of deformations." Proceedings of Workshop on Deformation Measurements. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., October, pp. 221-233.

USACE (2002). "Structural Deformation Surveying." US Army Corp of Engineers Publication no. EM 1110-2-1009.

USACE (1980). "Instrumentation for concrete structures." US Army Corp of Engineers Publication no. EM 1110-2-4300.

Wroblewicz, Z., Z. Solymar & G. A. Thompson (1988). "Deformation monitoring instrumentation at Mactaquac Generating Station, New Brunswick, Canada." Proceedings of the FIG 5th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Fredericton, pp. 593-601.

Zainal Abidin Md Som (2000). Penilaian Permodelan Selisihan Cerapan Menggunakan Kaedah Maximum Likelihood Estimates. Laporan Akhir Projek Penyelidikan Vot 71064, Research Management Center, UTM Skudai.

Zainal Abidin Md Som (1996). Penentuan Komponen Varians Bagi Cerapan Jaringan Deformasi Menggunakan Kaedah Minimum Norm Quadratic Estimation (MINQE). Tesis MSc, Fakulti Kej & Sains Geoinformas, UTM Skudai.